Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии

Козырев А. А.¹, Кузнецов Н. Н.^{1*}, Федотова Ю. В.², Шоков А. Н.³

¹ Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

² Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nikavalon@mail.ru

Реферат

Введение. На данный момент основной подход отнесения горных пород к удароопасным заключается в анализе их полной кривой деформирования и определении запредельных деформационных и энергетических параметров в условиях одноосного сжатия. Недостатком такого подхода является необходимость проведения исследований на специализированных жестких прессах, возможность приобретения которых ограничена их высокой стоимостью и единичным количеством изготовления.

Цель работы. Целью данной работы является сравнение результатов определения степени удароопасности скальных горных пород Хибинского и Ковдорского массивов Мурманской области по предлагаемой методике анализа допредельных кривых деформирования пород и по методике анализа полных кривых деформирования, полученных с использованием жестких прессов.

Методология. Экспериментально изучены энергетические параметры и характеристики деформирования скальных горных пород, определены параметры и характеристики их удароопасности. Предложена более простая методика определения степени удароопасности пород, исходя из анализа их кривой деформирования на допредельном участке, а также величин накопленной упругой энергии до предела прочности. Для этого не требуется испытательных прессов с повышенной жесткостью, а лабораторные исследования выполняются на обычном оборудовании стандартными методами.

Результаты. На основании проведенных исследований определены деформационные и энергетические параметры изучаемых горных пород, а также установлена категория их удароопасности – удароопасные или неудароопасные.

Выводы. Полученные данные позволили сделать вывод, что результаты оценки удароопасности горных пород по допредельной стадии деформирования полностью соответствуют результатам оценки, выполненной на основании анализа полной кривой деформирования.

Ключевые слова: удароопасность; деформирование; упругая энергия; скальные горные породы; лабораторные испытания; одноосное сжатие; образец.

Введение. При отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах и в скальных массивах с преобладающим действием тектонических напряжений все чаще возникают проблемы динамических проявлений горного давления [1–5]. В ряде случаев такие проявления происходят в виде горных ударов и техногенных землетрясений, последствия которых носят катастрофический характер. В связи с этим возникает необходимость предварительно проводить оценку удароопасности массива пород обрабатываемых месторождений.

Главными факторами, влияющими на динамические разрушения в массиве, являются способность горных пород к хрупкому разрушению и высокая напряженность массивов пород [1, 6, 7]. Изучение этих факторов позволяет выявлять потенциально удароопасные участки массива. В первом случае проводят лабораторные испытания, по результатам которых определяют деформационные и энер-

гетические параметры горных пород и их склонность к хрупкому разрушению. Во втором случае необходимо проведение специальных измерений *in situ*, позволяющих установить величины действующих напряжений в массиве.

Один из первых подходов к оценке склонности горных пород к хрупкому разрушению (удароопасности) по результатам испытаний образцов был предложен И. М. Петуховым и А. М. Линьковым [8]. В их работе склонность к удароопасности пород устанавливалась на основании сопоставления величин модуля спада и модуля упругости полной кривой деформирования пород при одноосном сжатии. При этом считается, что чем больше величина модуля спада превышает величину модуля упругости, тем более склонна порода к динамическому неуправляемому разрушению. В более поздней работе А. Н. Ставрогина и А. Г. Протосени [9] было предложено наоборот рассматривать отношение модуля упругости к модулю спада для определения удароопасности горных пород. При этом когда величина такого отношения (коэффициент удароопасности) меньше или равна единице, порода считается склонной к динамическому неуправляемому разрушению. Если же величина коэффициента удароопасности больше единицы, то порода не склонна к динамическим видам разрушения.

В дальнейшем такой подход был усовершенствован рядом исследователей. Для оценки удароопасности горных пород в условиях одноосного сжатия было предложено определять индекс динамически высвобожденной энергии [4, 10, 11] и коэффициент запасенной упругой энергии [12], а в условиях трехосного сжатия – индекс хрупкости [13]. Однако общим недостатком таких подходов является необходимость использования специализированных дорогостоящих прессов с повышенной жесткостью, производство которых осуществляется в малых количествах. В связи с этим возникла потребность в разработке метода, позволяющего определять склонность к удароопасности горных пород по результатам испытаний на стандартных прессах без определения запредельных характеристик.

По результатам исследований, выполненных в Горном институте КНЦ РАН на скальных горных породах Хибинского и Ковдорского массивов, была предложена методика определения степени удароопасности пород исходя из анализа кривой деформирования на допредельном участке [14]. Испытания проведены на обычном оборудовании стандартными методами. Тем не менее для увеличения степени достоверности проводимой по предложенной методике оценки необходимо выполнить сравнительные испытания на стандартных и жестких прессах.

Таким образом, целью данной работы является сравнение результатов определения степени удароопасности пород Хибинского и Ковдорского массивов по предлагаемой методике и по методике анализа полной кривой деформирования пород с использованием жестких прессов.

Методика оценки степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний до предела прочности. Для проведения оценки степени удароопасности и последующего сравнительного анализа были выбраны два типа скальных горных пород Хибинского массива – линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда и уртит среднезернистый массивный, и один тип пород Ковдорского массива – кальцитовый карбонатит. Такой выбор обусловлен тем, что представленные породы имеют различные прочностные и деформационные характеристики.

Испытания проводились в Горном институте КНЦ РАН на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System по стандартной методике. Образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру 2 : 1, а их количество составляло 4–5 шт. для каждого типа горной породы.

В ходе испытаний образцы нагружали до 30 % от предела прочности при сжатии и разгружали. Затем их нагружали до разрушения с регистрацией величин продольных деформаций при помощи продольных тензодатчиков, установленных в центральной части образцов, что позволило избежать влияния сил трения на опорных торцах образцов в соответствии с требованиями стандартных методик испытания образцов при одноосном сжатии. По результатам испытаний строили графики зависимости *напряжение–деформация* и рассчитывали величины энергии деформирования каждого образца.

На рис. 1 приведены типовые графики деформирования горных пород, которые принципиально могут иметь вогнутую (*OAC*) и выпуклую (*OEC*) форму относительно идеальной прямой линии (*OBC*), которая характеризует идеально упругое деформирование материала.

Величина энергии деформирования пород до предела прочности W_{Π} определяется как значение интеграла:

$$W_{\Pi} = \int_0^D \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где σ – нормальное напряжение; ε – относительная продольная деформация.

Величина энергии при идеально упругом деформировании $W_{и.у}$ определяется как площадь треугольника *OBCD* в координатах σ – ε (рис. 1):

$$W_{и.у} = S_{OBCD} = \frac{OD \cdot DC}{2}.$$

Когда в результате испытаний получаем кривую деформирования пород вогнутой формы, это значит, что энергия деформирования не накапливается в образце, а реализуется в виде пластических деформаций в процессе нагружения. При этом во все периоды времени энергия деформирования остается меньше величины энергии, соответствующей идеально упругому деформированию.

В том случае, когда кривая деформирования имеет выпуклую форму, упругая энергия накапливается в образце и во все периоды времени превышает величину энергии, соответствующую идеально упругому деформированию.

По результатам проведенных исследований было выявлено два указанных различающихся режима деформирования для испытанных типов пород и определен критерий отнесения пород к различным категориям по степени склонности к разрушениям в динамической или статической формах.

В частности, если значение реальной энергии деформирования меньше условно-расчетной идеально упругой энергии на величину свыше 10 %, то порода может быть уверенно отнесена к типу пород, разрушение которых возможно только в статическом режиме. Для этих пород разрушение в динамической форме маловероятно, следовательно, такие породы должны быть отнесены к категории «неопасных пород по горным ударам».

Рис. 1. Типовые графики деформирования скальных горных пород:

σ – нормальное напряжение; ε – относительная продольная деформация

Fig. 1. The typical graphs of hard rock's deformation:

σ – normal stress; ε – relative longitudinal deformation

Во всех остальных случаях, когда разница значений реальной энергии деформирования меньше условно-расчетной идеально упругой энергии на величину до 10 % или равна нулю, а также если значения реальной энергии превышают значения идеально упругой, то породы являются склонными к разрушениям в динамической форме, а массивы пород, включающие их, должны быть отнесены к склонным и опасным по горным ударам.

Методика оценки степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний за пределом прочности. Для корректности сравнительного анализа при проведении исследований за пределом прочности использовали образцы тех же пород, что и при испытаниях до предела прочности. Образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру 2 : 1, а их количество составляло 6 шт. для каждого типа горной породы.

Таблица 1. Результаты определения энергетических параметров исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии до предела прочности
Table 1. The results of energy parameters' determination of the studied hard rocks under uniaxial compression below the compressive strength

Наименование горных пород	Удельная энергия идеально упругого деформирования $W_{и.у}$, МДж/м ³	Удельная энергия деформирования при разрушении (реальная) $W_{п}$, МДж/м ³	Разница между $W_{и.у}$ и $W_{п}$		Заключение по показателю удароопасности
			МДж/м ³	%	
Ургит средне-зернистый массивный	0,1426	0,1426	0,0000	0	Удароопасный
	0,1591	0,1580	0,0011	1	
	0,2015	0,1996	0,0019	1	
	0,2010	0,2030	-0,0020	-1	
Среднее значение	0,1760	0,1758	0,0002	0	Удароопасный
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	0,1430	0,1197	0,0233	16	
	0,1554	0,1507	0,0047	3	
	0,1122	0,1120	0,0003	0	
	0,1746	0,1642	0,0104	6	
	0,0860	0,0763	0,0097	11	
Среднее значение	0,1343	0,1246	0,0097	7	Неудароопасный
Кальцитовый карбонатит	0,0066	0,0054	0,0012	18	
	0,0113	0,0079	0,0033	30	
	0,0171	0,0129	0,0042	25	
	0,0169	0,0125	0,0044	26	
	0,0169	0,0109	0,0060	35	
Среднее значение	0,0137	0,0099	0,0038	28	

Испытания проводились в Санкт-Петербургском горном университете на сервогидравлической установке MTS 816 с повышенной жесткостью в режиме контролируемых деформаций.

В ходе исследования образцы нагружали до 30 % от предела прочности при сжатии и разгружали. Затем их нагружали до разрушения в контролируемом режиме, чтобы получить запредельную ветвь деформирования. Величины продольных деформаций образцов регистрировали при помощи экстензометров фирмы MTS. По результатам испытаний строили полные графики зависимости

напряжение–деформация и определяли значения модулей упругости и спада для каждого образца горной породы.

На основании полученных в ходе исследований данных устанавливали величины коэффициентов удароопасности K_1 по формуле (1) [10]. В том случае, когда значение $K_1 \leq 1$, горная порода считается удароопасной. Если значение $K_1 > 1$, то порода неудароопасна:

$$K_1 = E / M, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, МПа; M – модуль спада, МПа.

Рис. 2. Графики деформирования образцов:

a – уррита среднезернистого массивного (образец № 7–16); b – кальцитового карбонатита (образец № 1–8–4); пунктирная линия – условная линия идеально упругого деформирования

Fig. 2. The graphs of samples' deformation:

a – medium-grained massive urtite (sample no. 7–16); b – calcite carbonatite (sample no. 1–8–4); dashed line – conventional line of ideal elastic deformation

Результаты и обсуждение. В табл. 1 представлены результаты определений энергетических параметров исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии до предела прочности.

Из табл. 1 следует, что наибольшие величины реальной удельной энергии деформирования W_{π} соответствуют образцам уррита среднезернистого массивного, прочностные и деформационные свойства которого самые высокие (среднее значение предела прочности при сжатии – 175 МПа, среднее значение модуля упругости – $7,22 \cdot 10^4$ МПа [15]). Величина реальной энергии образцов линзовидно-

полосчатой апатит-нефелиновой руды в среднем меньше этой величины, установленной для образцов уртита, на $0,0512 \text{ МДж/м}^3$. Наименьшее значение энергии установлено для кальцитового карбоната – самой слабой из исследуемых скальных горных пород (среднее значение предела прочности при сжатии – 80 МПа, среднее значение модуля упругости – $4,88 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ [15]).

Согласно предложенному критерию и представленным в табл. 1 результатам, реальная энергия деформирования апатит-нефелиновой руды и уртита среднезернистого массивного меньше идеально упругой энергии менее чем на 10 % (в среднем разница 0 и 7 % соответственно), что позволяет отнести их к удароопасным горным породам. Для карбоната разница между идеально упругой энергией и реальной энергией деформирования составляет в среднем 28 %. Следовательно, данная порода не является удароопасной.

Таблица 2. Результаты определения запредельных характеристик и параметров удароопасности исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии

Table 2. The results of determination of the post-peak characteristics and rockburst hazard parameters of the studied hard rocks under uniaxial compression

Наименование горных пород	Номер образца	Модуль упругости E , МПа $\cdot 10^4$	Модуль спада M , МПа $\cdot 10^4$	Коэффициент удароопасности K_1	Заключение по показателю удароопасности
Уртит среднезернистый массивный	6–16	7,36	147,37	0,05	Удароопасный
	6–17	4,66	10,51	0,44	Удароопасный
	6–18	6,05	30,24	0,20	Удароопасный
	7–15	6,46	114,38	0,06	Удароопасный
	7–16	7,62	56,83	0,13	Удароопасный
	8–16	6,72	198,12	0,03	Удароопасный
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	4–1	4,82	20,34	0,24	Удароопасный
	4–2	6,41	92,36	0,07	Удароопасный
	4–6	7,56	159,73	0,05	Удароопасный
	4–10	6,32	94,66	0,07	Удароопасный
	4–11	5,0	14,92	0,34	Удароопасный
	4–13	6,04	68,45	0,09	Удароопасный
Кальцитовый карбонатит	1–2–6	5,03	0,26	19,35	Неудароопасный
	1–3–4	3,96	1,92	2,06	Неудароопасный
	1–3–6	4,0	2,13	1,88	Неудароопасный
	1–5–4	4,8	0,59	8,14	Неудароопасный
	1–8–4	3,27	1,68	1,95	Неудароопасный
	46–7–4	4,12	0,99	4,16	Неудароопасный

По результатам выполненных в Санкт-Петербургском горном университете испытаний построены полные графики деформирования образцов исследуемых скальных горных пород. На рис. 2 представлены такие графики для образца уртита и кальцитового карбоната.

Из рис. 2 следует, что для образца уртита № 7–16 запредельная ветвь деформирования обрывается достаточно круто, как и для всех остальных образцов данной породы. При этом график до предела прочности почти полностью совпадает с условной линией идеально упругого деформирования. Подобное поведение характерно для склонных к удароопасности горных пород.

Для образцов карбонатита график деформирования за пределом прочности имеет форму плавной ниспадающей кривой (рис. 2). Участок графика до предела прочности, в свою очередь, имеет отчетливо вогнутый вид. Такой характер деформирования в большей степени соответствует горным породам, не склонным к удароопасности.

Результаты определений запредельных характеристик и коэффициентов удароопасности исследуемых скальных горных пород представлены в табл. 2.

Как следует из данных табл. 2, для всех образцов уртита и апатит-нефелиновой руды значения коэффициента удароопасности меньше единицы, то есть выполняется условие $K_1 \leq 1$. Таким образом, эти горные породы можно уверенно отнести к удароопасным. Для образцов карбонатита значения коэффициента удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является удароопасной.

При сопоставлении результатов определения степени удароопасности исследуемых горных пород по предлагаемой методике анализа кривой деформирования до предела прочности и методике анализа полной кривой деформирования пород с использованием жестких прессов можно сделать основной вывод, что и в том и в другом случае удароопасными оказались уртит среднезернистый массивный и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда, а неудароопасным – кальцитовый карбонатит. Также представленные на рис. 2 графики подтверждают идею о том, что характер деформирования склонных к хрупкому разрушению пород близок к идеально упругому, тогда как не склонных – к пластическому.

Таким образом, подтверждается, что предложенный подход позволяет определять склонность горных пород к разрушениям в динамической форме аналогично подходу, основывающемуся на анализе полной кривой деформирования пород и их запредельных характеристик.

Выводы. Выполненный сопоставительный анализ результатов оценки степени удароопасности трех типов скальных горных пород показал возможность использования предлагаемой методики без привлечения специализированных прессов с повышенной жесткостью.

Таким образом, определение склонности к разрушениям в динамической форме можно проводить на основании анализа допредельной кривой деформирования образцов и величин их реальной и расчетной идеально упругой энергии, руководствуясь следующими положениями:

- если характер деформирования образцов горных пород близок к пластическому (график деформирования имеет вогнутый вид), а накопленная энергия деформирования меньше расчетной упругой на величину свыше 10 %, то порода не склонна к разрушениям в динамической форме. В этом случае потеря устойчивости горных выработок будет происходить преимущественно в виде образования отдельных вывалов, ограниченных поверхностями структурных неоднородностей различного ранга;

- во всех остальных случаях, когда образцы деформируются упруго, породы склонны к разрушениям в динамической форме, а при проведении горных работ нельзя исключить реализацию разрушений типа горных ударов.

Полученные результаты исследований также свидетельствуют о том, что наиболее удароопасным из испытанных горных пород является уртит среднезернистый массивный, несколько менее удароопасны линзовидно-полосчатые апатит-нефелиновые руды и неудароопасен – кальцитовый карбонатит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козырев А. А., Панин В. И., Мальцев В. А., Аккуратов М. В. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах: сб. науч. ст. Апатиты, 1998. С. 73–82.
2. Лань Т., Чжан Х., Батурина И. М., Юй Л., Ли Ш., Хан Ц., Сун В., Тан Г. Исследование энергии системы горных ударов при подземной глубокой разработке на угольной шахте // ГИАБ. 2015. № 6. С. 287–292.
3. Kabwe E., Wang Y. Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines // Open Journal of Safety Science and Technology. 2015. № 5. P. 104–121.
4. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines. A case study of Sanshandao gold mine // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. № 8. P. 204–211.
5. Ptacek J. Rockburst in Ostrava-Karvina coalfield // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 1144–1151.
6. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. СПб: Недра, 1977. 503 с.
7. Петухов И. М., Ильин А. М., Трубецкой К. Н. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. М.: Академия горных наук, 1997. 384 с.
8. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
9. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
10. Singh S. P. Technical note. Burst energy release index // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1988. Vol. 21. P. 149–155.
11. Zhao T., Guo W., Yu F., Tan Y., Huang B., Hu S. Numerical investigation of influence of drilling arrangements on the mechanical behavior and energy evolution of coal models // Advances in Civil Engineering. 2018. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/aip/3817397/> (дата обращения 21.01.2019)
12. Kidybiski A. Bursting liability indices of coal // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract. 1981. Vol. 18. No. 4. P. 295–304.
13. Tarasov B. G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure // Deep Mining. Australian Centre for Geomechanics. Perth. 2010. P. 119–133.
14. Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Федотова Ю. В., Кузнецов Н. Н. Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. №1. С. 138–148.
15. Kuznetsov N. N., Fedotova I. V., Pak A. K. Strain and energy parameters of burst-prone rocks: study and analysis // Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3). Trondheim, Norway. 2018. P. 281–284.

Поступила в редакцию 7 мая 2019 года

Сведения об авторах:

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханики Горного института КНЦ РАН. E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Кузнецов Николай Николаевич – научный сотрудник лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ Горного института КНЦ РАН. E-mail: nikavalon@mail.ru

Федотова Юлия Викторовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории цифровых методов исследования природно-технических систем Института горного дела ДВО РАН. E-mail: fjulia@mail.ru

Шоков Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: ntl2000@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-41-50

The determination of rockburst hazard degree of hard rocks by the test results under uniaxial compression

Anatolii A. Kozyrev¹, Nikolai N. Kuznetsov¹, Iuliia V. Fedotova², Anatolii N. Shokov³

¹ Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia.

² Mining Institute FEB RAS, Khabarovsk, Russia.

³ St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract

Introduction. Currently the principal approach to the estimation of rock tendency to rockburst hazard consists in analyzing their complete stress-strain curve and defining the post-peak strain and energy

parameters under uniaxial compression conditions. The disadvantage of such method is a need of performing the studies on specialized stiff test machines. The possibility of such machines purchasing is limited by their high prices and unit quantity of production.

Research aim. Our work is aimed at comparing the determination results of rockburst hazard in the Khibiny and Kovdor rock massifs of the Murmansk region by applying the method proposed and a method of the complete stress-strain curve analysis of hard rocks with using stiff test machines.

Methodology. Energy parameters and strain characteristics of hard rocks have been experimentally studied, parameters and characteristics of their rockburst hazard have been determined. We propose a more simple method to determine the rockburst hazard for rocks by analyzing the strain curve at a pre-peak region and values of elastic energy accumulated till the compressive strength. For this we do not need the test machines with enhanced stiffness and the laboratory studies are performed on usual equipment by standard methods.

Results. Based on the studies, we determined the strain and energy parameters of the hard rocks, investigated and defined their rockburst category – rockburst hazardous or not.

Conclusions. The obtained data made it possible to conclude that the estimation results of rockburst hazard for the rocks at the pre-peak stage fully correspond to the results of estimation carried out on the basis of complete deformation curve analysis.

Key words: rockburst hazard; deformation; elastic energy; hard rocks; laboratory tests; uniaxial compression; sample.

REFERENCES

1. Kozyrev A. A., Panin V. I., Maltsev V. A., Akkuratov M. V. Prediction and prevention of rockbursts and man-induced earthquakes on the Khibiny apatite mines. In: *Geomechanics of mining in highly-strained massifs: collection of scientific articles*. Apatity: 1998. p. 73–82. (In Russ.)
2. Lan T., Chzhan H., Batugina I. M., Juj L., Li Sh., Han C., Sun V., Tan G. Research of rockburst system energy of coal mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 6: 287–292. (In Russ.)
3. Kabwe E., Wang Y. Review on rockburst theory and types of rock support in rockburst prone mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2015; 5: 104–121.
4. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines. A case study of Sanshandao gold mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016; 8: 204–211.
5. Ptacek J. Rockburst in Ostrava-Karvina coalfield. *Procedia Engineering*. 2017; 191: 1144–1151.
6. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kasparyan E. V. *The fundamentals of rock mechanics*. St. Petersburg: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)
7. Petukhov I. M., Iliin A. M., Trubetskoi K. N. *Prediction and prevention of rockbursts in mines*. Moscow: Akademiia gornykh nauk Publishing; 1997. (In Russ.)
8. Petuhov I. M., Linkov A. M. *Mechanics of rockbursts and bumps*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
9. Stavrogin A. N., Protosenia A. G. *The strength of rocks and stability of workings at great depths*. Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ.)
10. Singh S. P. Technical note. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1988; 21: 149–155.
11. Zhao T., Guo W., Yu F., Tan Y., Huang B., Hu S. Numerical investigation of influence of drilling arrangements on the mechanical behavior and energy evolution of coal models. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/ace/aip/3817397> [Accessed 21 January 2019].
12. Kidybiski A. Bursting liability indices of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*. 1981; 18 (4): 295–304.
13. Tarasov B. G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. *Deep Mining, Australian Centre for Geomechanics*. Perth, 2010, pp. 119–133.
14. Kozyrev A. A., Kasparian E. V., Fedotova Iu. V., Kuznetsov N. N. Estimating the rockburst hazard of hard rocks based on laboratory test results. *Vestnik MGTU: Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU: Scientific Journal of Murmansk State Technical University*, 2019; 22 (1): 138–148. (In Russ.)
15. Kuznetsov N. N., Fedotova I. V., Pak A. K. Strain and energy parameters of burst-prone rocks: study and analysis. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Rock Dynamics and Applications (RocDyn-3), Trondheim, Norway*. 2018. p. 281–284.

Received 7 May 2019

Information about authors:

Anatolii A. Kozyrev – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Geomechanics, Mining Institute KSC RAS. E-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru

Nikolai N. Kuznetsov – researcher of the Laboratory of Instrumental Study of Rock's State of the Russian Arctic Region, Mining Institute KSC RAS. E-mail: nikavalon@mail.ru

Iuliia V. Fedotova – PhD (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Digital Methods of Natural-Technology System Study, Mining Institute FEB RAS. E-mail: fjulia@mail.ru

Anatolii N. Shokov – PhD (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Physical-Mechanical Properties and Rock Destruction, Saint-Petersburg Mining University. E-mail: ntl2000@yandex.ru

Для цитирования: Козырев А. А., Кузнецов Н. Н., Федотова Ю. В., Шоков А. Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41–50. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-41-50

For citation: Kozyrev A. A., Kuznetsov N. N., Fedotova Iu. V., Shokov A. N. The determination of rockburst hazard degree of hard rocks by the test results under uniaxial compression. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 41–50 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-41-50